هفتمین کنفرانس بین‌المللی
مهندسی قابلیت اطمینان و ایمنی

ارزیابی دز بشکه و محفظه بتنی دفن پسماند جامد نیروگاه اتمی بوشهر با استفاده از مدلسازی مونت‌کارلو

سعید زارع گنجارودی[۱،۲*]، علی شهابیان آلاشتی[۲] ، امیرمسعود طاهریان [۲]، علی مالکی فارسانی[۲] و سید سعید مومن زاده[۲]

۱- دانشکده فیزیک و انرژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ایران، szareganjaroodi@aut.ac.ir

۲- شرکت مدیریت پسماندهای پرتوزای ایران، کد پستی: ۱۴۳۹۹۵۵۹۳۱، تهران، ایران

چکیده

علی‌رغم موفقیت انرژی هسته‌ای به عنوان عامل کلیدی و اقتصادی برای حل بحران انرژی در دنیا، مشکلات جدی را نیز پیش روی بشر قرار داده است. حجم پسماند پرتوزا تولید شده در نیروگاه‌های هسته‌ای به مراتب کمتر از دیگر نیروگاه‌های تولید برق می‌باشد اما بسیار خطرناک‌تر و مراقبت و مدیریت آن بسیار حساس‌تر است. در یک طبقه‌بندی کلی بر اساس پرتوزایی، پسماند تولیدی در صنعت هسته‌ای به سه دسته پسماند با پرتوزایی بالا، متوسط و کم طبقه‌بندی می‌شود. قبل از دفن پسماند پرتوزا در پسماندگاه تمامی مواد باید بصورت جامد در بشکه‌های دفن و سپس محفظه بتنی جایگذاری شوند. در صورتی که برخی از پسماندها در فاز مایع بوده باشند بوسیله بتن جامدسازی شوند. پسماندهای جامد در طی بهره‌برداری، تعمیرونگهداری و شرایط اضطراری در نیروگاه تولید می‌شوند، که از لحاظ پرتوزایی در طبقه کم و متوسط، طبقه‌بندی می‌گردند. یک راه‌حل بهینه جهت مدیریت پسماندهای جامد، جاگذاری بشکه‌های پسماند در محفظه بتنی و دفن کم عمق این محفظه‌های حاوی بشکه‌های پسماند می‌باشد. هدف اصلی از این مطالعه، ارزیابی پرتوی بشکه و محفظه بتنی دفن پسماند جامد نیروگاه اتمی بوشهر با استفاده از کد شبیه‌ساز MCNPX می‌باشد. از این‌رو، پس از بررسی موجودی بشکه‌های پسماند جامد تولیدی راکتور VVER-1000 نیروگاه اتمی بوشهر، بشکه‌های آهنی و محفظه بتنی حاوی بشکه‌های پسماند جامد در آرایش چهارتایی، هشت‌تایی، دوازده‌تایی، شانزده‌تایی و بیست‌تایی مدلسازی گردید. در نهایت مقادیر دز منتشر شده از پسماند در فواصل مشخص محاسبه شد تا با مقایسه با گزارشات ملی و بین‌المللی مشخص گردد که مقادیر دز از حد آستانه تعیین‌شده کمتر می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: پسماند پرتوزا، محفظه بتنی، نیروگاه اتمی بوشهر، MCNPX، VVER-1000

مقدمه

نیروگاه‌های هسته‌ای، تنها نیروگاه‌های تولید انرژی هستند که باید پسماند تولیدی آنها نیز مدیریت گردد. در یک تعریف کلی، پسماند هسته‌ای به ضایعات ناخواسته و محصولات فرعی تولیدی در آزمایشات‌تحقیقاتی، کشاورزی و صنعت‌پزشکی در فرآیند تولید انرژی هسته‌ای اطلاق می‌گردد. امروزه، چندین روش نوین دفع پسماند نظیر فشرده‌سازی، پردازش شیمیایی، شیشه‌سازی، محفوظاسازی و ذخیره‌سازی در دنیا استفاده می‌گردد. مطابق با گزارشات آژانس بین‌المللی انرژی اتمی، پسماندهای هسته‌ای بر اساس مقدار اکتیویته به سه دسته پسماند با حد پرتوزایی بالا، متوسط و پایین تقسیم‌بندی می‌شوند. در این دسته بندی، ۹۰٪ کل پسماندهای تولیدی از نوع اول می‌باشند [۲،۱].

پسماندهای رادیواکتیو از نقطه نظر فرآیند تولید به دو صورت کنترل‌شده و خارج از کنترل به وجود می‌آیند. پسماندهای نوع کنترل‌شده در حقیقت محصولی از چرخه سوخت هسته‌ای بوده و یا از کاربرد رادیونوکلوئیدها در زمینه تحقیقات، پزشکی–دارویی و یا صنایعی که از چشمه‌های رادیواکتیو مصرف‌شده در صنایع دارویی استفاده می‌کنند، بوجود می‌آیند. بالعکس پسماندهایی که خارج از کنترل به وجود می‌آیند، پسماندهایی می‌باشند که از حوادث غیر مترقبه و یا جایی که مراقبت‌های ویژه مربوط به تشعشعات حد مجاز رعایت نشود بوجود می‌آید. منابع پسماندهای رادیواکتیو از چرخه سوخت هسته‌ای با توجه

به مراحل مختلف این چرخه به سه مرحله ابتدای چرخه سوخت هسته‌ای، بخش عملیاتی چرخه سوخت هسته‌ای و انتهای چرخه سوخت تقسیم‌بندی می‌شود [۳-۵].

مرحله ابتدای چرخه سوخت هسته‌ای، اولین مرحله از چرخه می‌باشد که شامل معدن‌کاری و استخراج سنگ‌های اورانیوم و توریم و سپس تولید سوخت می‌باشد. در این میان محصولات رادیواکتیو دیگری نظیر رادیوم که کاربردهای متنوعی دارد از سنگ‌های مورد نظر جدا و برای مصارف دیگر به کار برده می‌شوند. میزان پسماند ناشی از معدن‌کاری در مقایسه با مقدار باطله‌های آسیاب و خردگی سنگ بسیار متغیر می‌باشد که این به دلیل روش‌های متفاوت معدن‌کاری از قبیل؛ لیچینگ درجا، معدن زیرزمینی، معدن رو باز و ویژگی‌های زمین‌شناسی کانسارهای سنگ معدن می‌باشد [۳-۵].

بخش عملیاتی چرخه سوخت هسته‌ای از پسماندها از راه‌اندازی و عملیات راکتورها بوجود می‌آیند. این پسماندها شامل فیلترهای استفاده شده، رزین‌های تبادل یونی، تبخیرکننده‌ها، تغلیظ‌کننده‌ها و میله‌های جاذب می‌باشند. [۳-۵].

در نهایت، پسماندهای مرحله انتهایی چرخه سوخت شامل سوخت مصرف‌شده، فرآوری و احیاء اورانیوم و پلوتونیوم و سوخت مصرف‌شده و پسماند با سطح اکتیویته بالا می‌باشند که باید با الزامات و طبق قوانین بین‌المللی مدیریت شوند.

پسماند پرتوزای تولید شده در نیروگاه هسته‌ای قبل از مراحل دفن و پسمانداری دائم باید به صورت جامد باشد. برخی از این مواد که به صورت فاز مایع می‌باشند نیز باید بوسیله بتن جامدسازی گردند. پسماندهای جامد که در طی بهره‌برداری، تعمیرونگهداری و شرایط اضطراری در نیروگاه تولید می‌شود که از لحاظ پرتوزایی در طبقه کم و متوسط، طبقه‌بندی می‌گردند که شامل کاغذ، دستمال رفع‌آلودگی، کفش، کلاه و دیگر موارد می‌باشند. لازم به‌ذکر است که این پسماندها بطور مستقیم خرد و متراکم‌شده و در بشکه‌های مربوطه جهت مدیریت پسماند قرار خواهند گرفت. بطورکلی پسماندهای جامد شامل دو گروه می‌باشند. گروه اول شامل موادی با پرتوزایی بسیار کم می‌باشد. این در حالیست که گروه دوم پسماند جامد مانند گروه اول بوده ولی مقادیر اکتیویته رادیونوکلوئیدهای آن بیشتر است [۵-۶].

به طور کلی، یک نیروگاه قدرت ۱۰۰۰ مگاواتی سالیانه حدود ۶۰۰ بشکه پسماند تولید می‌کند. با فرض اینکه عمر نیروگاه ۷۰ سال باشد، تعداد کل بشکه‌های تولیدی در طی ۷۰ سال ۴۲۰۰۰ عدد بشکه خواهد بود. حال با تخصیص ۱۲٪ از کل بشکه‌های پسماند به پسماند تولیدی ناشی از فرآیند برچیدن تجهیزات نیروگاه هسته‌ای، تعداد کل بشکه‌های پسماند ناشی از این فرآیند در طی ۷۰ سال، ۵۰۴۰ بشکه خواهد بود. بنابراین تعداد کل بشکه‌های پسماند تولیدی از فرآیند و برچیدن تجهیزات در طی ۷۰ سال کارکرد نیروگاه ۴۷۰۴۰ بشکه خواهد بود. در نتیجه یک نیروگاه قدرتی ۱۰۰۰ مگاواتی حدود ۴۷۰۴۰۰ بشکه پسماند در طی ۷۰ سال تولید خواهد کرد [۳].

جینگ وی و همکارنش در سال ۲۰۲۱ میلادی مقاله‌ای با عنوان "کپسوله‌سازی سزیم با ماتریس سولفوآلومینات مشتق از پسماند جامد با رویکرد اقتصاد چرخشی برای تصفیه پسماندهای هسته‌ای با پسماندهای جامد" در مجله Hazardous Materials چاپ کردند [۷]. همچنین تحقیقات رابی و همکارانش در سال ۲۰۱۷ میلادی با عنوان "تجزیه‌وتحلیل اجزای محدود انتقال یون در مواد پسماند هسته‌ای حالت جامد" در ژورنال Nuclear Materials به چاپ رسیده است [۸]. ویلیام و فرانک نیز در سال ۱۹۹۸ میلادی مقاله‌ای تحت عنوان "مروری بر اثرات تشعشع در اشکال پسماند هسته‌ای جامد" را در این زمینه در ژورنال Nuclear Technology چاپ کردند [9]. از این‌رو، تا کنون مطالعه‌ای در زمینه ارزیابی دز پسماند در فواصل به صورت عملیاتی برای یکنیروگاه انجام نشده است. در این مقاله، این محاسبات برای پسماند جامد نیروگاه اتمی بوشهر قبل از دفن اعم از ترانشه کم عمق یا عمیق انجام می‌شود.

هدف از ارائه این مقاله ارزیابی دز بشکه و محفظه‌بتنی دفن پسماند جامد نیروگاه اتمی بوشهر با استفاده از کد MCNPX می‌باشد. از این‌رو، پس از مدلسازی بشکه دفن و محفظه بتنی، محاسبات دز در فواصل مشخص انجام شد تا بتوان تعیین کرد که در چه فاصله‌ای می‌توان از مقدار دز منتشر شده صرفه‌نظر کرد.

روش‌کار

MCNPX کد هسته‌ای مونت کارلویی است که بطورکلی جهت ترابرد تابش و ردیابی بسیاری از انواع ذرات در محدوده گسترده‌ای از انرژی طراحی شده‌است. این کد نسل بعدی در سری کدهای ترابرد مونت‌کارلو است که طراحی آن نزدیک ۶۰ سال پیش در آزمایشگاه ملی لوس‌آلاموس آغاز گردید. MCNPX توانایی پیکربندی و شبیه‌سازی سه بعدی مواد را درون سلول‌هایی که با سطوح مرزبندی شده‌اند را دارد. توانایی محاسبه ویژه مقادیر سیستم‌های حاوی مواد شکافت‌پذیر نیز یکی از خصوصیات ارزشمند کد است. یکی دیگر از نقاط قوت MCNPX داشتن اطلاعات مربوط به انرژی‌های پیوسته است. تمام واکنش‌هایی که نوترون‌ها در برخورد با هسته دارند (شکافت، پراکندگی الاستیک، پراکندگی غیر الاستیک و دیگر موارد) در کد MCNPX در نظر گرفته شده و کتابخانه‌های سطح مقطع برای این برهمکنش‌ها موجود است. در کد، برای اندرکنش فوتون‌ها، پراکندگی‌های همدوس و ناهمدوس، امکان گسیل فلوئورسانس پس از جذب فوتوالکتریک، تولید زوج (الکترون پوزیترون)، گسیل در محل نابودی زوج و تابش ترمزی در نظر گرفته شده و کتابخانه‌های آن وجود دارد [۱۰-۱۲].

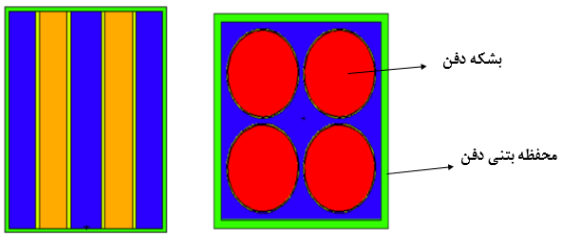
همانطور که بدان اشاره شد پسماند جامد گروه ۲ شامل موادی نظیر کاغذ، فلزات، چوب و دیگر موارد می‌باشد که محدوده اکتیویته ویژه به مقدار ۳/۷×۱۰۶ تا ۳/۷×۱۰۹ بکرل بر گرم را دارد. شایان ذکر است که نرخ دز سطحی منتشر شده از این مواد بین ۰/۳ تا ۱۰ میلی‌سیورت بر ساعت می‌باشد. بطور کلی، بیش از ۴۰٪ رادیونوکلوئیدهای موجود در پسماند جامد گروه ۲ از نوع محصولات خوردگی و بقیه آن محصولات شکافت‌پذیر (بیش از ۵۰٪) می‌باشد.

ابتدا بشکه دفن پسماند جامد به صورت مجزا مدلسازی شد و سپس در یک آرایش چهارتایی بشکه‌های پسماند در محفظه بتنی قرار داده شد. محفظه‌های بتنی گنجایش چهار، هشت، دوازده، شانزده و بیست‌تایی را در آرایش چهارتایی داراست. علت استفاده از محفظه‌های بتنی با گنجایش بیشتر از چهار عدد این است که، به دلیل جامد بودن پسماند بشکه‌ها را می‌توان فشرده‌سازی نمود؛ از این رو تنها موجودی مجموعه رادیونوکلوئیدهای موجود در هر بشکه افزایش خواهد یافت. در نهایت، با استفاده از تالی F2، انتخاب مد فوتون برای محاسبات وردیابی ذرات در کد و همچنین ضرایب DE و DF برای تبدیل مقادیر شار به دز محاسبات انجام شد. ذکر این نکته ضروری است که چشمه رادیواکتیو ساطع‌کننده اشعه همان پسماند پرتوزا درون بشکه می‌باشد. در جدول (۱) مشخصات طراحی بهینه بشکه و محفظه بتنی دفن پسماند جامد لیست شده است.

جدول ۱: مشخصات هندسی و مواد بشکه و محفظه دفن بتنی پسماند جامد

پارامتر	مقدار
بشکه دفن پسماند	
شکل	استوانه
شعاع (سانتی‌متر)	۲۸/۷۵
ارتفاع (سانتی‌متر)	۸۱/۰۰
ضخامت (سانتی‌متر)	۰/۳۰
جنس ماده	آهن
محفظه بتنی دفن پسماند	
شکل	مکعب
طول (سانتی‌متر)	۱۵۵
عرض (سانتی‌متر)	۱۵۵
ارتفاع (سانتی‌متر)	۱۲۰
ضخامت (سانتی‌متر)	۱۰
جنس ماده	بتن

در این مقاله از کد احتمالاتی MCNPX برای شبیه‌سازی بشکه‌ها و محفظه بتنی دفن استفاده شده است تا بتوان مقادیر دز سطحی و نقطه‌ای منتشر شده را مطابق گزاراشات آژانس بین‌المللی انرژی اتمی [۱۲] محاسبه و صحت‌سنجی نمود. در شکل (۱) چند نما از بشکه و محفظه بتنی دفن مدلسازی شده در کد MCNPX نشان داده شده است.



(ب) (الف)

شکل ۱: نمای از بالا (الف) و جانبی (ب) محفظه بتنی دفن مدلسازی شده با کد MCNPX [۱۱]

نتایج

به‌طور کلی، پسماند جامد تولیدشده در نیروگاه اتمی بوشهر شامل دو گروه می‌باشد که گروه اول بدلیل مقادیر دز انتشاری بسیار پایین از محاسبات آن صرف نظر شده است. از سویی دیگر، پسماند جامد گروه ۲ شامل مواد مختلف با سطح آلودگی‌های متفاوت بوده که در بشکه‌هایی با ابعاد مشخص و جرم ۷۰ کیلوگرم بسته‌بندی می‌شود. مطابق با گزارش نهایی ایمنی راکتور بوشهر [۱۳] مقدار دز سطحی منتشر شده از این بشکه‌ها در محدوده ۰/۳ تا ۱۰ میلی‌سیورت بر ساعت می‌باشد. جدول (۲) مقادیر دز منتشر شده از بشکه (بصورت مجزا) و محفظه‌بتنی دفن با ظرفیت ۴ بشکه را نشان می‌دهد.

جدول ۲: مقادیر دز منتشر شده از بشکه (بصورت مجزا) و محفظه‌بتنی دفن با ظرفیت ۴ بشکه

	دز سطحی (mSv/h)
بشکه دفن پسماند	۳/۴۳
محفظه‌بتنی دفن پسماند	۰/۰۰۵۸

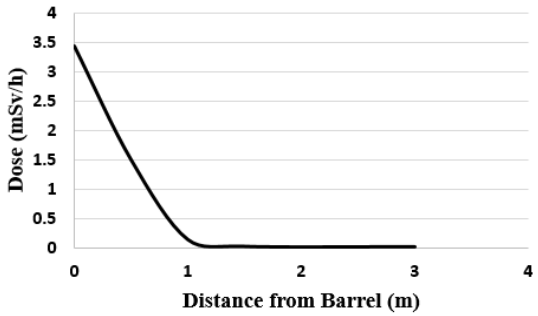
مطابق با نتایج مقدار دز سطحی منتشر شده از بشکه در محدوده تعیین شده [۱۳] قرار دارد. همچنین با توجه به کاهش چشمگیر مقدار دز در محفظه بتنی دفن می‌توان دریافت که ضخامت و جنس محفظه بتنی جهت دفن پسماند جامد مناسب می‌باشد.

با توجه به اهداف مدیریت پسماند جهت کاهش حجم انبار دفن در این مقاله سناریوهای دفن محفظه بتنی با آرایش ۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۰ تایی بشکه‌های پسماند جامد بررسی شده است که در جدول (۳) مقادیر دز سطحی مربوط به هر یک آورده شده است.

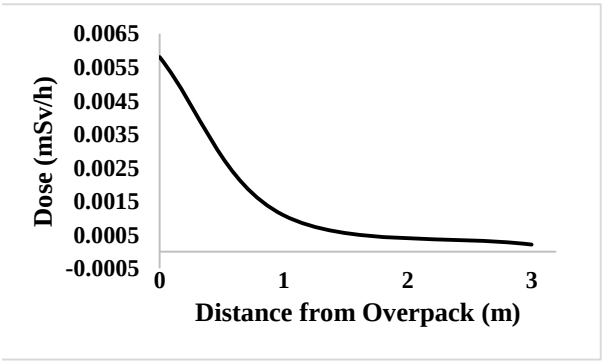
جدول ۳: مقادیر دز منتشر شده از محفظه‌بتنی دفن پسماند در آرایش‌های چندگانه

	دز سطحی (mSv/h)
محفظه‌بتنی دفن پسماند آرایش ۸ تایی	۰/۰۰۷۹۰۲
محفظه‌بتنی دفن پسماند آرایش ۱۲ تایی	۰/۰۰۸۹۶۰
محفظه‌بتنی دفن پسماند آرایش ۱۶ تایی	۰/۰۰۹۵۰۲
محفظه‌بتنی دفن پسماند آرایش ۲۰ تایی	۰/۰۰۹۷۳۹

همانطور که از جدول (۳) مشاهده می‌شود، با اضافه شدن تعداد بشکه مقدار دز منتشر شده نیز افزایش می‌یابد. این در حالیست که، در بیشینه تعداد بشکه دفن در محفظه‌بتنی نیز مقدار دز به حدود ۰/۰۱ میلی‌سیورت بر ساعت می‌رسد که این مقدار مطابق با گزارشات بین‌المللی منتشر شده از سوی آژانس بین‌المللی انرژی اتمی [۶] در محدوده قابل قبول قرار دارد. اشکال (۲) و (۳) نمایی از کاهش دز تا فاصله ۳ متری از بشکه و محفظه بتنی دفن پسماند پرتوزا را نشان می‌دهد.



شکل ۲: نمودار کاهش دز منتشر شده از بشکه پسماند جامد برحسب فاصله



شکل ۳: نمودار کاهش دز منتشر شده از محفظه‌بتنی پسماند جامد برحسب فاصله

مطابق با اشکال (۲) و (۳) مقدار دز رسیده به محیط تا فاصله ۳ متری از محفظه بتنی و بشکه کاهش چشمگیری داشته و در مقایسه با توافقات بین‌الملل، این مقادیر زیر حد مجاز می‌باشند [۱۳].

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

هدف اصلی از ارائه این مقاله، محاسبات دز منتشر شده از بشکه و محفظه بتنی دفن پسماند جامد تولیدی در نیروگاه بوشهر می‌باشد. در این مطالعه، جهت مدلسازی با استفاده از کد MCNPX و استفاده از تالی F2 از پنج نوع آرایش چهارتایی، هشت‌تایی، دوازده‌تایی، شانزده‌تایی و بیست‌تایی در محفظه‌بتنی استفاده شده است. نتایج نشان داد، مقدار دز منتشر شده از سطح بشکه دفن پسماند جامد در حدود ۳/۴ میلی‌سیورت بر ساعت می‌باشد. این در حالیست که این مقدار برای محفظه‌بتنی دفن با آرایش ۴ بشکه حدود ۰/۰۰۵۸ میلی‌سیورت بر ساعت می‌باشد. با ارزیابی دز منتشر شده در سطح محفظه‌بتنی دفن با آرایش‌های ۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۰ تایی می‌توان دریافت که مطابق انتظار بیشینه دز منتشر شده مربوط به آرایش ۲۰ تایی با مقدار حدود ۰/۰۱ میلی‌سیورت بر ساعت می‌باشد. همچنین، با محاسبه مقادیر کاهش دز برحسب فاصله می‌توان نتیجه گرفت که تا فاصله حدود ۳ متری از بشکه و محفظه بتنی دفن پسماند، مقدار دز کاهش چشمگیری داشته که این روند کاهشی مطابق با توافقات بین‌الملل گزارش شده از سوی آژانس بین‌المللی انرژی اتمی بوده و نشان از طراحی مناسب هندسه محفظه دفن و مواد آن دارد.

مراجع

[1] Radioactive Waste Management, World nuclear association, January 2022.
[2] The International Nuclear Society Council (INSC) has published information relating to particular countries' waste policies and actions. See the Radioactive Waste paper from the report of its 1997-98 Action Plan and its Current Issues in Nuclear Energy – Radioactive Waste report (2002).
[3] IAEA. Determination and Use of Scaling Factors for Waste Characterization in Nuclear Power Plants - Nuclear Energy: IAEA. No. Nw-T-1. 18..
[4] National Report- Prepared Within the Framework of the Joint Convention On the Safety of Spent Fuel Management and On the Safety of Radioactive Waste Management: IAEA, 2011.
[5] J. Z. R. K. Jaroslava Ko, "Concrete and cement composites used for radioactive waste," Elsevier, 2017.
[6] Regulation for the safe transport of radioactive material SSR-6," IAEA, 2012.
[7] Jingwei Li et al, Encapsulation of cesium with a solid waste-derived sulfoaluminate matrix: A circular economy approach of treating nuclear wastes with solid wastes, Journal of Hazardous Materials, 2021, 126156.
[8] F. Rabbi, K. Brinkman, J.Amoroso, K. Reifsnider, Finite element analysis of ion transport in solid state nuclear waste form materials, Journal of Nuclear Materials, 2017, Pages 303-309.
[9] William J. Weber, Frank P. Roberts, A Review of Radiation Effects in Solid Nuclear Waste Forms, Nuclear Technology, 1983 - Issue 2: Radiation Effects and their Relationship to Geological Repositories.
[10] Nick T. Thomopoulos, Essentials of Monte Carlo Simulation Statistical Methods for Building Simulation Models, springer, (2013).
[11] Pelowitz, D.B, MCNPXTM Uses manual, Los Alamos national laboratory, (2008).
[12] IAEA Safety Standards for protecting people and the environment, Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material, IAEA, 2012 Edition, Specific Safety Requirements, No. SSR-6.
[13] Final Safety Analyses Report" 49. BU.1.0.0.0.0. FSAR.RDR0010. Nuclear Power Plant Division. Tehran: Nuclear power plant Bushehr, 2007.